

Рис.4. Графики зависимости  $Z^*$  от расположения элементарных витков образца относительно витков катушки для стали Ст.45 а) и стали X18N10T б) на разных глубинах проникновения: 1.  $\delta = 0,3$  мм; 2.  $\delta = 0,4$  мм; 3.  $\delta = 0,5$  мм.

**Заключение.** Данная математическая модель позволяет оценить изменение эквивалентного сопротивления ВТП с различными образцами и при различных режимах его работы. Так, например, если зафиксировать для известного материала частоту зондирования, то можно рассчитать изменение  $Z_{экв}$  в зависимости от изменения характеристик  $\mu_r$  и  $\sigma$  на глубине  $\delta$  при поверхностном упрочнении материала.

**Список литературы:** 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн.-М.: Машиностроение, 2003.-688 с. 2. Гальченко В.Я. Информационные модели в теории и практике электромагнитной дефектоскопии. – Луганск: Издательство Восточноукраинского государственного университета, 1997. – 262 с., ил. 3. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.-Л: Издательство АН СССР, 1948. – 727 с. 4. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. Киев: Техніка, 1974. – 352 с. 5. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с. 6. Луний В.П. Двухшаговый алгоритм конечно-элементного решения задач электромагнитного контроля. Вихретоковый контроль. Дефектоскопия, №12, 2006., С. 62-69. 7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 368 с.

УДК620.179.14

**МИРОШНИКОВ В.В.**, д-р техн. наук, проф., ВНУ им. В. Даля, Луганск. **КРАСНЯКОВ О.Л.**, асп., ВНУ им. В. Даля, Луганск.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕЕРНОГО МЕТАЛЛОДЕТЕКТОРА

Надана методика розрахунку основних параметрів металодетектору в залежності від розміру поля збудження та поля, створеного металевими включеннями.

The method of calculation of basic parameters metal-detector is offered depending of the value of the exciting field and field, which created the metallic inclusions.

В процессе добычи и переработки сыпучих материалов, к которым можно отнести большой ряд материалов от угля, щебенки до зерна и сахара, они засоряются металлическими включениями (МВ). МВ это детали, элементы конструкций и инструментов, с помощью которых добывается, транспортируется и перерабатывается данный материал. По статистической оценке от 87% до 92% МВ, выявляемых в сыпучих материалах, являются ферромагнитными. Для их извлечения, и тем самым для защиты технологического оборудования, широко используются различные типы железоотделителей. Железоотделитель представляет собой П-образный электромагнит, габаритные размеры которого определяет ширина транспортной ленты (от 500 мм до 2000 мм) и извлекающая способность, т. е. величина создаваемого им магнитного поля. Потребляемая мощность железоотделителей колеблется от 600 до 15000 Вт, что при круглосменной работе позволяет отнести это оборудование к высокоэнергоёмким. Естественно, возникает задача о снижении энергозатрат путем кратковременного включения железоотделителя в момент прохождения МВ в потоке материала.

Проведенные исследования на горно-обогатительной фабрике показали, что при суточном объеме переработки угля 8,3 тыс. тонн частота выявления металлических включений составляет 20–30 случаев. Масса выявленных МВ распределяется следующим образом: 0,1...1,0 кг – 45%; 1,0...4,0 кг – 15%; 4,0...10 кг – 30% и свыше 10 кг – 10%. При месячном объеме производства в 250 тыс. тонн угля масса выявляемых МВ составляет 1,3...1,5 тонн.

Приведенные выше данные показывают, что железоотделитель является необходимым элементом технической безопасности технологического оборудования и в то же время имеется возможность уменьшить его энергопотребление.

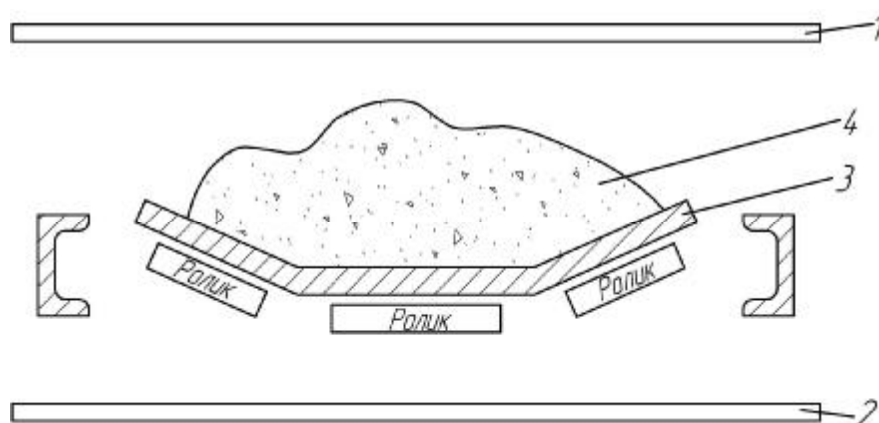
Учитывая периодичность появления МВ железоотделитель целесообразно держать в "теплом" состоянии, т. е. на 5...10% от полной мощности и включать на полную мощность только при обнаружении МВ.

Таким образом, металлодетектор является необходимым элементом системы управления железоотделителя, что позволяет экономить до 80...85% электроэнергии.

На рис. 1 представлена схема расположения катушек металлодетектора на транспортере.

Рис. 1. Схема металлодетектора транспортной 1 – измерительные катушка транспортной контролируемый

Такая катушек их монтировать ленты. При этом возбуждения прямоугольной которой определяются шириной транспортной ленты (рис. 2).



расположения относительно ленты: катушки; 2 – возбуждения; 3 – лента; 4 – материал.

конструкция позволяет легко без разрыва обмотки иметь форму, размеры

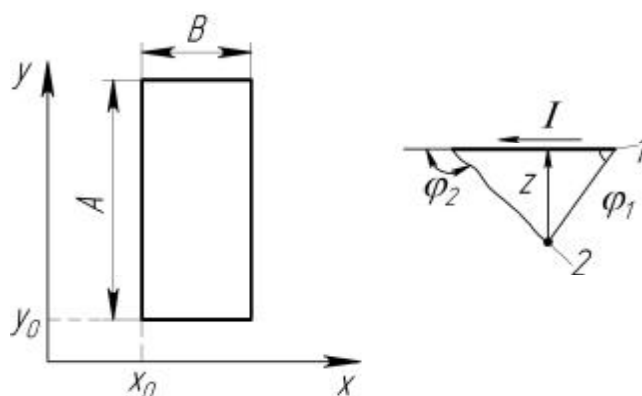


Рис. 2. К расчету поля катушки возбуждения:

1 – виток обмотки возбуждения; 2 – расчетная точка.

Для расчета поля создаваемого обмоткой возбуждения рассмотрим поле одинарного прямоугольного витка размером  $A \times B$ . Поле в исходной точке определяется [1] согласно закона Био-Савара-Лапласа

$$dH = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I}{Z^3} [d\vec{l} \times \vec{Z}]$$

Определим коэффициенты для каждой грани катушки возбуждения

$$\begin{aligned} C_{\varphi_1} &= \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}}; \quad C_{\varphi_{1y}} = \frac{A - y_0}{\sqrt{x_0^2 + z^2 + (A - y_0)^2}}; \\ C_{y_1} &= \frac{B - x_0}{\sqrt{y_0^2 + z^2 + (B - x_0)^2}}; \quad C_{y_{1A}} = \frac{B - x_0}{\sqrt{z^2 + (B - x_0)^2 + (A - y_0)^2}}; \\ C_{y_2} &= \frac{y_0}{\sqrt{y_0^2 + z_0^2 + x^2}}; \quad C_{\varphi_{2B}} = \frac{A - y_0}{\sqrt{z^2 + (B - x_0)^2 + (A - y_0)^2}}; \\ C_{y_{2B}} &= \frac{y_0}{\sqrt{z^2 + y_0^2 + (B - x_0)^2}}; \quad H_{z_1} = -\frac{y_0}{(z^2 + y_0)^2} \cdot (C_{\varphi_1} + C_{y_1}); \\ H_{z_2} &= H_{z_1} - \frac{A + y_0}{(z^2 + (A - y_0))^2} \cdot (C_{\varphi_{1y}} + C_{y_{1A}}); \quad H_{z_3} = -\frac{x_0 \cdot (C_{\varphi_2} + C_{y_2})}{z_2^2 + x_0^2} + H_{z_2}. \end{aligned}$$

Окончательно получаем формулу для расчета поля в любой точке, находящейся под витком обмотки возбуждения

$$H_z = \frac{I}{4\pi} \cdot \left( H_{z_3} - \frac{B - x_0}{z^2 + (B - x_0)^2} \cdot (C_{\varphi_{2B}} + C_{y_{2B}}) \right).$$

Учитывая большие геометрические размеры обмотки возбуждения, наиболее оптимальным, с точки зрения энергетических затрат, является импульсный режим возбуждения. Для определения тока, протекающего по обмотке возбуждения, рассмотрим цепь коммутации (рис. 3).

При расчете примем допущение, что величина емкостного накопителя  $c_1 \dots c_n$  достаточно большая и заряд, за время действия импульса возбуждения не меняется. Тогда, согласно закона Кирхгофа [2] можно записать следующую систему уравнений

$$L_{OB} \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = 0$$

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{c} \int_{t_1}^t Idt = 0,$$

где  $L_{OB} = \mu_0(A+B) \cdot \frac{\ln(A+B)}{2\pi}$ , [3] – индуктивность обмотки возбуждения; R – полное сопротивление цепи, состоящей из сопротивления транзистора и активного сопротивления обмотки возбуждения; q – заряд емкостного накопителя.

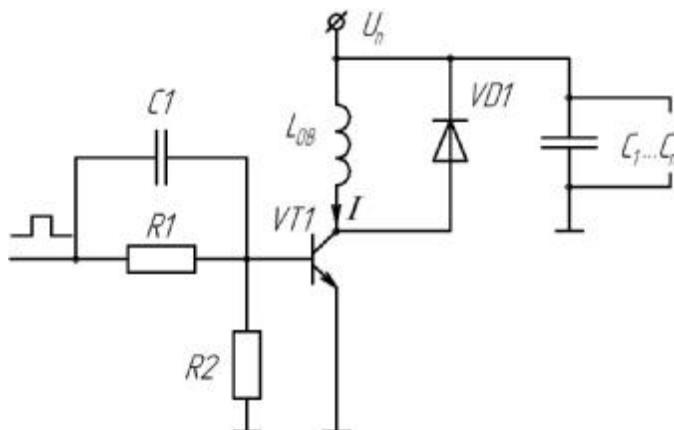


Рис. 3. Электронный ключ для питания обмотки возбуждения.

Учитывая, что напряжение на обмотке в форме близкой к прямоугольному импульсу, будем считать, что сопротивление R изменяется по такому же закону (рис. 4).

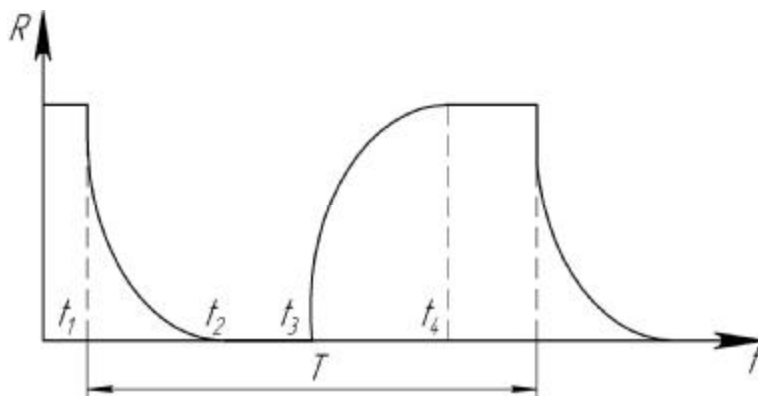


Рис. 4. Закон изменения сопротивления.

Приняв такой характер изменения сопротивления, ток в обмотке возбуждения будет изменяться следующим образом  $\frac{dI}{dt} = \frac{U - RI}{L}$ , где U – напряжение питания.

Используя метод Рунге-Кутты найдем изменение тока в цепи

$$I(t + \Delta t) = I(t) + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4),$$

где  $K_1 = \Delta t \cdot f(t, I)$ ;  $K_2 = \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, I + \frac{K_1}{2}\right)$ ;  $K_3 = \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, I + \frac{K_2}{2}\right)$ ;  $K_4 = \Delta t \cdot f(t + \Delta t, I + K_3)$ .

Таким образом, рассчитываются основные параметры цепи возбуждения и величина поля, создаваемого обмоткой возбуждения.

Найдем теперь поле вихревых токов МВ, которое наводится полем возбуждения. Для этого заменим вихревые токи магнитным диполем и найдем его поле [4]

$$H = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{3(\bar{P} \cdot \bar{r}) \cdot \bar{r}}{r^5} - \frac{\bar{P}}{r^3} \right),$$

где  $\bar{P} = 2\pi a d^3 \operatorname{Re}(D_{in}) \omega_{in} \cdot \bar{H}_{in}$  – дипольный момент;  $\omega_{in} = 2\pi f$ ;  $f$  – частота поля возбуждения;  $H_{in}$  – напряженность поля возбуждения:

$$D_{in} = -2 \frac{(2\mu_1 n_{lin} + \mu_2 n_{2in})}{2\mu_1 n_{lin} - 2\mu_2 n_{2in}},$$

$$n_{2in} = n_{lin} - v_{in}^2 sh v_{in}; \quad n_{lin} = sh v_{in} - v_{in} st v_{in}; \quad v_{in} = \sqrt{\mu_1 \omega_{in} \sigma d};$$

$\mu_1$  – магнитная проницаемость МВ;  $\mu_2$  – магнитная проницаемость контролируемой среды;  $\sigma$  – удельная проводимость материала МВ;  $d$  – характерный размер магнитного диполя для материала МВ.

Рассчитав дипольный момент для трех составляющих поля  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  мы находим поле, которое создают вихревые токи в МВ.

$$H_{z_1} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{3(P_x \cdot x + P_y \cdot y + P_z \cdot z) \cdot z_1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{P_z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right),$$

где  $x, y, z$  – расстояния от измерительной обмотки до точки расчета, в которой определяется дипольный момент.

Полученное значение напряженности магнитного поля позволяет рассчитать, в первом приближении, значение э. д. с., наводимой в измерительной обмотке металлодетектора.

Предложенная модель расчета позволяет определить основные параметры металлодетектора, к которым относятся: число витков обмотки возбуждения и измерительных обмоток, частота поля возбуждения, ток обмотки возбуждения и расстояние между обмоткой возбуждения и измерительной обмоткой. Проведенные экспериментальные исследования с металлодетектором на ширину конвейерной ленты 1600 мм с параметрами: число витков обмотки возбуждения – 18; число витков измерительных обмоток – 120; ток возбуждения – 6 А; частота поля возбуждения – 1 кГц; расстояние между обмоткой возбуждения и измерительной обмоткой – 0,7 м, показали, что данный металлодетектор в центре со 100% вероятностью выявляет стальной шарик диаметром 18 мм по всей глубине контроля. Чувствительность металлодетектора к краям конвейерной ленты падает, и он надежно выявляет шарик диаметром 30 мм на расстоянии 0,4 м от обмотки возбуждения.

**Список литературы:** 1. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Высшая школа, 1986. 2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Энергоиздат, 1986. 4. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: "Наука", 1971.